

Силовая электроника

УДК 621.316.72

А.В. Заграничний

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

Особенности частотных характеристик устройств для ядерного магнитного резонансу

Отримано резонансні характеристики систем «фільтр + випромінювач», «L + випромінювач», «випромінювач» в пристроях ядерного магнітного резонансу. На основі проведених математичних розрахунків резонансних частот, що обмежують діапазон підлаштування частоти перетворювача, зроблено висновок про доцільність використання пристрою ЯМР без резонансного фільтра, але зі згладжувальною індуктивністю. За допомогою проведеного моделювання в середовищі *Mat-Lab\Simulink* показано доцільність збільшення кількості рівнів вихідної напруги багаторівневого інвертора. Бібл. 6, рис. 5.

Ключові слова: зондувальна напруга, ядерний магнітний резонанс, частотна характеристика, широтно-імпульсна модуляція, інвертор.

Вступ

Як відомо, в пристроях ядерного магнітного резонансу використовується зондувальний сигнал Хана [2]. В [5] показано, що при великих потужностях зондувальних струмів та напруг доцільно використовувати ключовий режим роботи

перетворювача. При цьому напруга та струм потрібної форми можуть бути сформовані на основі широтно-імпульсної модуляції з подальшою фільтрацією. Для покращення спектрального складу вихідного сигналу використовується резонансний фільтр, що суттєво звужує частотний діапазон підлаштування пристрою ЯМР. Під час ядерно-магнітних досліджень параметри елементів фільтра та випромінювача можуть змінюватися, відповідно, змінюється резонансна частота випромінювача, на яку необхідно налаштувати пристрій. Отже, існує необхідність підлаштувати частоту перетворювача.

Таким чином обґрунтування доцільності використання пристрою для ядерного магнітного резонансу з можливістю підлаштування частоти перетворення є досить актуальною задачею.

Резонансні характеристики пристроїв ЯМР

Відомо, що число резонансних частот для канонічних схем на одиницю менше числа реактивних елементів [1]. Система «фільтр+випромінювач» містить 4 реактивні елементи (рис.1.), отже маємо три резонансні частоти.

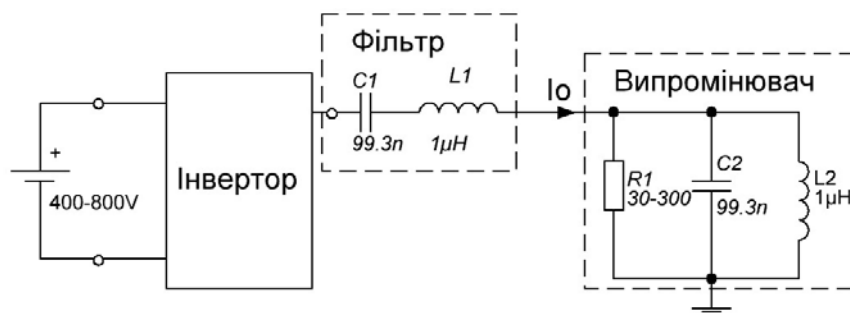


Рис. 1. Функціональна схема фільтра і випромінювача пристрою ЯМР

Явище ядерного магнітного резонансу відбувається при налаштуванні пристрою на ларморовську частоту f_L [6]. При цьому в паралельному коливальному контурі, тобто в випромінювачі спостерігається резонанс струмів на частоті ω_0 . Окрім цього в системі виникають резонанси напруг на частотах, які можуть бути визначені:

$$\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} = \frac{1}{(-\omega C_2 + 1/\omega L_2)},$$

де L_1, L_2 індуктивність фільтра та випромінювача відповідно, C_1, C_2 - ємність фільтра та випромінювача відповідно.

Після деяких спрощень отримаємо:

$$\omega^4 L_1 L_2 C_1 C_2 - \omega^2 L_2 C_1 - \omega^2 L_2 C_2 - \omega^2 L_1 C_1 + 1 = 0$$

Параметри фільтра та випромінювачі підібрані так, що $L_1 = L_2, C_1 = C_2$

Тому отримаємо біквадратне рівняння:

$$\omega^4 L^2 C^2 - 3\omega^2 LC + 1 = 0$$

Розв'язавши його, отримаємо наступні частоти для резонансу напруг:

$$\omega_1 = 1,618/\sqrt{LC} = 1,618 \cdot \omega_0,$$

$$\omega_2 = 0,618/\sqrt{LC} = 0,618 \cdot \omega_0$$

Резонансні характеристики системи зображена на рис.2.

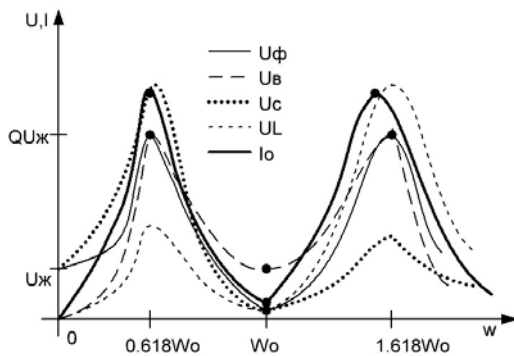


Рис. 2. Графіки резонансної характеристики системи «фільтр+випромінювач»: залежність вхідного струму від частоти та залежність напруг на фільтрі, його елементах та випромінювачі від частоти

Як видно з рис.2., при зміщенні частоти відносно точки резонансу струмів відбувається зростання вхідного струму. Це збільшує втрати енергії, а також зменшує час роботи пристрою, оскільки система є автономною, і перетворювач

живиться від акумуляторної батареї. При цьому напруга на резонансному фільтрі та його елементах і на випромінювачі починає також зростати і в точках резонансів напруг досягає значення, що у Q (де Q - добротність) разів перевищує напругу живлення. При вихідній напрузі інвертора 400-800В та добротності $Q \approx 32$ виникають значні перенапруги не тільки на елементах резонансного фільтра, але і на випромінювачі. З урахуванням цих недоліків доцільним є використання системи без резонансного фільтра. В такій системі має місце тільки один резонанс струмів (рис.3.).

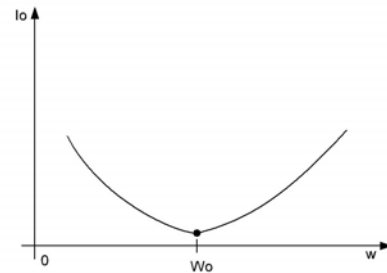


Рис. 3. Графік резонансної характеристики випромінювача: вхідний струм

З рис.3. видно, що при зміні частоти і зміщенні відносно точки резонансу зростає споживання вхідного струму. За відсутності резонансного фільтра амплітуда напруги на випромінювачі незмінна та рівна вихідній напрузі інвертора.

При цьому вихідна напруга інвертора прямокутної форми буде безпосередньо прикладатися до ємності випромінювача, що викликати значні сплески струмів. Для уникнення цього використано індуктивність, підключену послідовно до паралельного контуру. Така система уже міститиме три реактивних елементи, а відтак, два резонанси:

$$\omega L_1 = \frac{1}{(-\omega C_2 + 1/\omega L_2)}.$$

Після спрощень, за умови, що $L_1 = L_2$, отримаємо:

$$\omega^2 LC = 2$$

$$\omega = \sqrt{2}\omega_0,$$

де ω_0 частота резонансу струмів.

Резонансна характеристики зображена на рис.4.

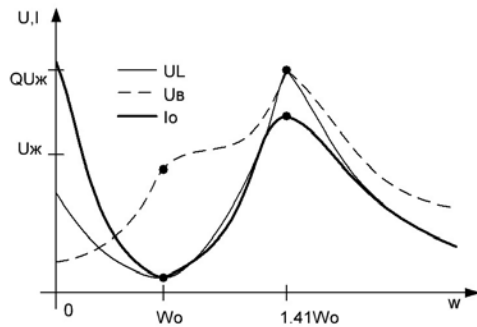


Рис. 4. Графіки резонансної характеристики системи «L+випромінювач»: вхідний струм та напруга на випромінювачі і згладжувальній індуктивності

З рис. 4. видно, що при зміщенні частоти перетворювача нижче резонансної частоти ω_0 спостерігається зростання споживання вхідного струму і напруги на згладжувальній індуктивності, а напруга на випромінювачі зменшується. При зміщенні ж частоти вище частоти резонансу, при зростанні вхідного струму спостерігається зростання напруги на індуктивності та випромінювачі і в точці резонансу напруг буде рівна $Q \cdot U_{ж}$.

Таким чином, в системі «L+випромінювач» відсутній небажаний резонанс напруг на частоті $\omega_1 = 0,618/\sqrt{LC}$, однак залишається резонанс напруг на частоті $\omega = \sqrt{2}\omega_0$. При цьому стає можливим регулювання частоти напруги нижче резонансної частоти ω_0 , що розширює діапазон регулювання частоти перетворювача.

Моделювання процесів в середовищі MatLab

Спектр ідеального сигналу Хана (індуктивна складова струму випромінювача) містить три гармоніки з частотами $\omega_0, \omega_0 + \Omega, \omega_0 - \Omega$ та амплітудами $A_0, A_0/2, A_0/2$ відповідно [5]. Де Ω - частота модуляції. Дослідження спектрів вихідної напруги інвертора та струмів в елементах пристрою проводилися за допомогою розробленої моделі три- та п'ятирівневого інвертора в середовищі MatLab. При формуванні сигналу Хана за допомогою ШІМ-керованого інвертора спектр вихідної напруги містить гармоніки кратних та комбінаційних частот ω_0, Ω [3].

Проведене моделювання показало, що зміщення частоти перетворення інвертора нижче або вище частоти резонансу струмів більше ніж на 5 відсотків спотворює форму індуктивної складової струму випромінювача в системі «фільтр+випромінювач» та викличе зростання споживання вхідного струму інвертора (рис.5. а, б). Для уникнення цих недоліків доцільно використовувати систему без резонансного фільтра.

Без використання резонансного фільтра погіршується спектральний склад зондувальної напруги і, відповідно, струму випромінювача. Покращення спектрального складу струмів та напруг можливе при використанні системи «L+випромінювач» та збільшенні кількості рівнів напруги багаторівневого перетворювача: зменшуються амплітуди кратних та комбінаційних гармонік.

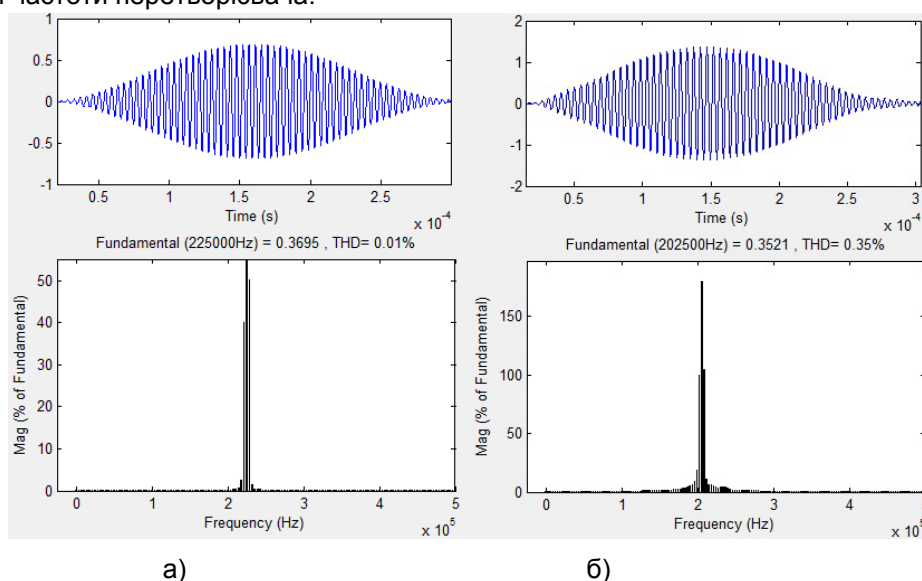


Рис. 5. Спектральний склад струму випромінювача та вихідної напруги інвертора: а) індуктивна складова струму в системі «фільтр+випромінювач»; б) індуктивна складова струму в системі «фільтр+випромінювач» зі зміщенням частоти інвертора відносно частоти резонансу струму

Висновки

1. В пристроях ядерного магнітного резонансу доцільно використовувати систему «L+випромінювач» для отримання зондувальної напруги та струму випромінювача.

2. При використанні згладжувальної індуктивності діапазон регулювання частоти перетворювача зріс в 3 рази в порівнянні з системою з використанням резонансного фільтра.

Список використаних джерел

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Гардарики, 2000.
2. George Coates, Lizhi Xiao, Manfred Prammer. NMR Logging, Principles and Applications. – Halliburton Energy Services, USA 1999.
3. Гончаров Ю.П., Буденный О.В., Морозов В.Г. Преобразовательная техника. Учебник Ч2. – Харьков: Фолио, 2000г.
4. Джафаров И.С., Сынгаевский П.Е., Хафизов С.Ф. Применение метода ядерного магнитного резонанса для характеристики состава и распределения пластовых флюидов. – М.: Химия, 2002.
5. Заграничний А.В., Рогаль В.В. Способы формирования зондувальної напруги в пристроях ядерного магнітного резонансу. Електроніка і зв'язь. – 2013. – № 5(76).- С. 19-24.
6. Фаррар Т., Беккер Э. Импульсная и Фурье спектроскопия ЯМР.- М.: Мир, 1973.

Поступила в редакцию 26 мая 2014 г.

УДК 621.316.72

А.В. Заграничный

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

Особенности частотных характеристик устройств для ядерного магнитного резонанса

Получены резонансные характеристики систем «фильтр + излучатель», «L + излучатель», «излучатель» в устройствах ядерного магнитного резонанса. На основе проведенных математических расчетов резонансных частот, ограничивающих диапазон подстройки частоты преобразователя, сделан вывод о целесообразности использования устройства ЯМР без резонансного фильтра, но с сглаживающей индуктивностью. С помощью проведенного моделирования в среде MatLab\Simulink показана целесообразность увеличения количества уровней выходного напряжения многоуровневого инвертора. Библ. 6, рис. 5.

Ключевые слова: зондирующее напряжение, ядерный магнитный резонанс, частотная характеристика, широтно-импульсная модуляция, инвертор.

UDC 621.316.72

A.V. Zagranichnyi

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
st. Polytechnique, 16, building 12, Kyiv, 03056, Ukraine.

Features of the frequency characteristics of the devices for nuclear magnetic resonance

Resonance characteristics of a "filter + emitter", "L + emitter", "emitter" in devices for nuclear magnetic resonance are obtained. On the basis of mathematical calculations of the resonance frequencies, limiting the range of frequency adjustment concluded the feasibility of using NMR device without a resonant filter,

but with a smoothing inductance. With the help of the simulations in the environment MatLab\Simulink shows the practicability of increasing the number of levels of output voltage of multilevel inverter. References. 6, Fig. 5.

Keywords: *probing voltage, nuclear magnetic resonance, frequency characteristic, pulse-width modulation, inverter.*

References

1. *Bessonov L.A.* (2000), "Theory of Electrical Engineering. Electrical circuit". Moscow, Gardariki. (Rus)
2. *George Coates, Lizhi Xiao, Manfred Prammer.* NMR Logging, Principles and Applications. - Halliburton Energy Services, USA 1999.
3. *Goncharov Y.P., Budennyi O.V., Morozov V.G.* (2000), "Conversion equipment. Textbook B2". Kharkov, Folio. (Rus)
4. *Jafarov I.S., Syngaevsky P.E., Hafizov S.F.* (2002), "The application of nuclear magnetic resonance to characterize the composition and distribution of reservoir fluids". Moscow, Khimiya. (Rus)
5. *Zagranychnyi A.V.* Methods of forming voltage probing for devices nuclear magnetic resonance. Electronics and Communications. – 2013. - № 5(76).- С. 19-24. (Ukr)
6. *Farrar T., Becker E.* (1973), "Pulse and Fourier spectroscopy NMR". Moscow, Mir. (Rus)